

<https://helda.helsinki.fi>

ZHODNOTENIE VPLYVU TROPOSFÉRICKÉHO OZÓNU NA VYBRANÉ LESNÉ EKOSYSTÉMY SR

Tupek, Boris

2009

Tupek , B 2009 , ' ZHODNOTENIE VPLYVU TROPOSFÉRICKÉHO OZÓNU NA VYBRANÉ
LESNÉ EKOSYSTÉMY SR ' , Technical University Zvolen .

<http://hdl.handle.net/10138/229497>

submittedVersion

Downloaded from Helda, University of Helsinki institutional repository.

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

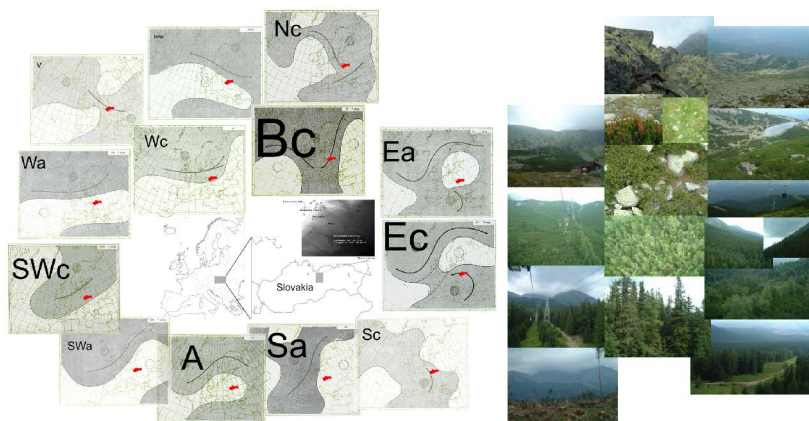
Please cite the original version.

TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE LESNÍCKA FAKULTA



Katedra prírodného prostredia

ZHODNOTENIE VPLYVU TROPOSFÉRICKÉHO OZÓNU NA VYBRANÉ LESNÉ EKOSYSTÉMY SR



Autoreferát dizertačnej práce
na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor
Vedný odbor: 15-21-9 ekológia

Ing. Boris ŤUPEK

2009

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Katedre prírodného prostredia Lesníckej Fakulty Technickej Univerzity vo Zvolene (KPP LF TU Zvolen).

Predkladateľ: Ing. *Boris Ťupek*
Katedra prírodného prostredia Lesníckej Fakulty
Technická univerzita vo Zvolene
ul. T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen

Školiteľ: Prof. Ing. *Ladislav Tužinský*, CSc. / KPP LF TU Zvolen

Školiteľ konzultant: Prof. Ing. *Jaroslav Škvarenina*, CSc. / KPP LF TU Zvolen

Oponenti: Doc. RNDr. *Dušan Závodský*, CSc.
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK Bratislava
Ing. *Peter Fleischer*, PhD.
Výskumná stanica - Štátne lesy TANAPu, Tatranská Lomnica
Doc. RNDr. Ing. *Jozef Mind'áš*, PhD.
Lesnícky výskumný ústav Zvolen

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná pred komisiou pre obhajoby dizertačných prác vo vednom odbore 15-21-9 ekológia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa:

Predseda spoločnej odborovej komisie:

Prof. Ing. *Eduard Bublinec*, CSc.

ABSTRACT

Tropospheric ozone uptake into forests of Slovakian High Tatras

Keywords: tropospheric ozone, forest ozone stress, ozone uptake

Tropospheric ozone (O_3) degrades plant tissues. Degradation is caused by the unbalance between the O_3 uptake from the atmosphere and the subsequent O_3 detoxication in the leaf mesophyll. The ozone uptake (UO_3) is controlled by the opening - closing of the stomata, stomatal conductance for O_3 . The study sites forms the elevation transect in Slovakian High Tatra Mountains (Stará Lesná, Tatranská Lomnica, Štart, Deviatka, Skalnaté pleso, Lomnický štít). In the stations we were continuously measuring daily ambient O_3 concentrations, simultaneously with the meteorological weather characteristics (air temperature and moisture, global radiation) during the period of 2001-2003. Beside the weather records, we kept the track on the synoptic movements and the pressure formations of the airmasses over the Europe.

The O_3 stress index AOT40 surpassed 2 to 5 times the level for the protections of the forest stands 10 ppm/h. Based on the principles of stomatal conductance for O_3 we calculated the values of UO_3 for the coniferous stands of the tatra transect. The values of cumulated UO_3 did not reach the level of 10 mmol/m², what means by the study of Wieser (1997) for the similar conditions that the reduction of the net photosynthesis did not reach 5%. We used the calculated values of UO_3 (based on the principle of the ambient air O_3 concentrations and stomatal conductance for O_3) to develop a non-linear regression model between UO_3 and the air temperature. The ozone uptake model based on the air temperature explained on the average 74% of the variation. The optimal temperature of around 15 to 17 degree Celsius showed the maximum ozone uptake 0.031 - 0.046 ug/m²/s, while 60% of maximum UO_3 was found in the 10 degrees deviation from the optimum temperature.

The parameters of the non-linear regression between the ozone uptake and the temperature were fitted for each synoptic type (ST). Maximum UO_3 for the cyclonic situations were higher and reached during higher optimal temperature, while typically warmer anticyclonic situations showed lower maximum UO_3 during the lower optimal temperature. The average maximum UO_3 level of all synoptic types was 1500 ug/m²/d reached at the 18.6 degree Celsius. According to the ozone uptake models were the maximum values of UO_3 for cyclonic situations on the average 1700 ug/m²/d reached at the 19.0 degree Celsius. Whereas, typically warmer anticyclonic situations reached on the average about 500 ug/m²/d lower maximum UO_3 at the lower optimal temperature 18.0 degree Celsius. The model residuals from the modeled and calculated UO_3 for daily synoptic types did not show a clear trend. Differences among the model residuals were by far pronounced during the analysis with 4-days sequences of the same weather pattern. The most frequent 4-days sequence during the summer season Wa (West anticyclone) deviated plus 100 to 1000 ug/m²/d of UO_3 from the modeled value. In contrary to Wa, the 4-days sequences A and Sa mainly lowered UO_3 values by 500 to 700 ug/m²/d from the modeled value.

Ozone induced damage on the plant is not the result of the high ambient O_3 concentration itself. The damage comes, if the balance between the ozone uptake and the O_3 detoxication inside leaf mesophyll is shifted towards the ozone uptake. The study focused on the ozone uptake means considering the physiological O_3 stress from the accumulation point of view, advanced to the ambient O_3 concentration itself. On the other hand, measuring biochemical processes of depleting detoxicants, ascorbate pool, and remaining O_3 concentrations degrading plant tissues would improve the quality of the future O_3 stress studies.

1. ÚVOD

Troposférický ozón prítomný v prízemnej vrstve atmosféry je škodlivým prvkom degradácie vnútorných pletív rastlín. Prirodzene vzniká fotooxidáciou prírodných prchavých organických zlúčenín (VOC), alebo priamo poklesom zo stratosféry. Tiež vzniká antropogénne fotooxidáciou ozónových prekursorov (CH_4 , NO_x , VOC, NOC – nemetánové organické látky) emitovaných ľudskou činnosťou hlavne spaľovaním fosílnych palív (Závodská a Závodský 1992). V podmienkach zvýšených O_3 koncentrácií sa na lesných porastoch prejavuje fyziologický O_3 stres vyjadrený najčastejšie indexom AOT40 (kumulatívnu hodinovou expozíciou O_3 koncentrácií v ovzduší väčších ako 40 ppb počas hodín vegetačnej sezóny so slnečným svitom) (Furher et al. 1997). Alternatívne vyjadrenie fyziologického O_3 stresu predstavuje ozónový príjem a kumulatívny ozónový príjem (Emberson et. al., 2000a; Wieser et. al., 2000; Matyssek et al., 2004). Na základe súčasných výskumov sú dostupné hodnoty O_3 príjmu využiteľné pre určenie redukcie čistej fixácie uhlíka, a akumulácie biomasy. Hodnoty O_3 príjmu sú potrebné pre nové štúdie detoxikačnej O_3 kapacity s určením hladín výskytu degradačných listových zmien, a tiež pre nové štúdie koreňového rastu a porušenia statickej stability porastov.

1.1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

V podmienkach trvale zvýšených O_3 koncentrácií sa na lesných porastoch prejavuje fyziologický O_3 stres. Cieľom práce bolo posúdiť vplyv troposférického ozónu na lesné porasty Tatranského výškového transektu (Stará Lesná, Tatranská Lomnica, Štart, Deviatka, Skalnaté pleso, Lomnický štít) v nasledovných úlohách:

1. Posúdiť meteorologické pomery pre stanice výškového transektu výskumných plôch.
2. Určiť ozónový príjem pre stanice výškového transektu výskumných plôch.
3. Vyhodnotiť vplyv synoptických typov počasia na ozónový príjem pre stanice výškového transektu výskumných plôch.

1.2 STAV PROBLEMATIKY

Troposférický ozón patrí medzi základné znečisťujúce látky spodných vrstiev ovzdušia západnej a strednej Európy. Vyskytuje sa v koncentráciách, ktoré ukazujú časovú a priestorovú variabilitu. Zimné O_3 koncentrácie hraničnej vrstvy troposféry sa vyskytujú od 19 do 27 ppb nad európskym kontinentom, s vyššími hladinami na jeho západnej časti, zatiaľ čo v lete sa kontinentálne hodnoty pohybujú medzi 39 a 56 ppb.

Ozón je vnášaný do lesných porastov a následne ovplyvňuje fyziológiu stromov, dynamiku rastlinných spoločenstiev, a biogeochemické cykly na porastovej alebo krajinskej úrovni. Zameranie na lesný porast alebo krajinu predstavuje výskum dopadu chronických účinkov O_3 a viacerých polutantov. Chemická záťaž je zreteľná nielen pre jednotlivé listy ale aj pre celé korunové zápoje (Baldochi et al, 1991). V lesnom ekosystéme sú O_3 vplyvy čitateľnejšie cez zmeny viditeľného poškodenia koruny stromov, ale aj cez nepriame zmeny fyzického a chemického prostredia (napr. cez vlastnosti pôdy), alebo schopnosti rastliny

súťažiť o obmedzené zdroje (napr. živiny, vodu, svetlo), alebo schopnosť znášať škodcov a patogénov.

Hlavne pre ihličnany sa oproti odhadnutiu viditeľného O₃ poškodenia stromov v porastoch ako alternatívna diagnostická metóda osvedčila svetelná (LM) a transmisná elektrónová mikroskopia (TEM) (Kivimäenpää et al., 2004). Mikroskopia je možný hodnotiaci nástroj, pretože ozón vytvára mikroskopické zmeny listovej štruktúry (Günthardt-Goerg et al., 2000). Ozón môže vytvárať nešpecifické zmeny, ako napr. akumuláciu cytoplazmatických lipidových agregátov, alebo špecifické zmeny ako napr. zvýšený počet plastoglobúl a zmeny v chloroplastoch ihlíc.

Mechanizmus odolnosti na rôzne formy znečistenia je spojený s redukciou čistej fotosyntézy v dôsledku oxidácie pigmentov a fotochemických enzýmov (Pell et al. 1992) a s väčšou alokáciou uhlíka na zachovanie a na regeneráciu poškodených pletív (Taylor 1994). Pretože spôsob alokácie sa u rastlín vyvinul smerom k optimálnemu využitiu dostupného uhlíka, každá zmena vo fixácii pravdepodobne ovplyvňuje následné prerozdelenie C do rozličných rastlinných pletív (Mooney a Winner 1991). V semenáčikoch bolo zistené, že ozón spôsobuje redukcie v koreňovom/vrcholcovom pomere na úkor koreňového rastu (McLaughlin et al. 1994).

Experimenty odhadujúce zmeny vzťahu medzi O₃ hladinami a znížením rastu a fotosyntézy viedli k zvýšenému záujmu o hraničnú koncentráciu v Európe vyjadrenú ako index AOT40, ktorý je akumulovaná koncentrácia nad hranicou 40 ppb (Furher et al. 1997). Je to suma 1-hodinových O₃ koncentrácií C nad hodnotou 40 ppb počas obdobia vegetačnej sezóny. Jej jednotkou je ppm/h, a v prípade lesa ide o periódu len denných hodín od apríla do septembra. Kritická hodnota pre stromy je 10 ppm/h (Nabel, 1999). AOT40 má dve dôležité vlastnosti pre index s biologickým významom. Zahŕňa expozíciu v čase, a je zameraný na vyššie koncentrácie. Ozónové poškodenie ale závisí na dávke O₃ v listoch a prítomnosti obranných mechanizmov vo vnútri pletiva (Heath, 1994). Dáta porovnávajúce O₃ expozície ku zmenám čistej fotosyntézy silne potvrdzujú, že variácia v pozorovaných fotosyntetických hodnotách dospelých ihličnanov môže byť vysvetlená kumulatívnym O₃ príjmom (Wieser, 1997).

Druhy s vysokou rýchlosťou výmeny plynov, ako napr. skoro-sukcesné tvrdé listnáče, sa vyznačujú najväčšími redukciami rastu v porovnaní s pomaly-rastúcimi druhmi ako napr. smrek (Skarby et al. 1995). Vodivosť prieduchov je regulátorom ozónového príjmu pri každej O₃ koncentrácii. Všetky zmeny environmentálnych podmienok - svetlo, teplota a vlhkosť, ovplyvňujú otváranie prieduchov a preto tiež možný O₃ tok (Wieser, 2000). Vodivosť prieduchov je závislá aj na veku a veľkosti stromu, pozícii jeho koruny, klímy a nadmorskej výšky (Wieser, 2000).

Mechanizmy rastlinnej reakcie na ozón nie sú stále úplne preskúmané, hoci existuje všeobecné pravidlo, že ozón musí vstúpiť dovnútra listu cez prieduchy aby spôsobil poškodenie listového pletiva. Preto otváranie a zatváranie prieduchov je dôležitý faktor kontrolujúci ozónovú citlivosť rastlín. Avšak funkcia prieduchov môže byť tiež ovplyvnená ozónovým poškodením (Mansfield a Pearson, 1996). Okrem kontroly prenikania O₃ prieduchy riadia hlavne príjem uhlíka CO₂. Keď rastlina zatvorí svoje

prieduchy, zamedzí ďalší O₃ príjem, ale súčasne je vystavená pridanému stresu v dôsledku jej rastu a alokácie fotosyntátov na opravu buniek zničených počas ozónovej expozície. Popri ozóne majú vplyv na výmenu plynov aj iné environmentálne podmienky, ktoré môžu tiež pozmeniť O₃ príjem a poškodenie. Napríklad nízke fotosynteticky aktívne žiarenie (PAR) významne vplýva na rýchlosť fotosyntézy a môže zvýšiť citlivosť rastlín na O₃ (Volin et al., 1993). Pomer O₃ príjmu a asimilácie sa C sa ukázalo byť oveľa vyššie u rastlín rastúcich pri nízkom PAR, ako u rastlín rastúcich pri vysokom PAR (Fredericksen et al., 1996). Preto druhy rozdielne v procesoch výmeny plynov, sú pravdepodobne iné v ich reakcii na O₃. Ozónové koncentrácie v noci môžu zostať rovnako vysoké, alebo vyššie ako cez deň (hlavne vo vysokých polohách, Wieser, 2000), a druhy s nekompletným uzatváraním prieduchov v noci môžu podliehať drastickému listovému poškodeniu (Matyssek a Innes, 1999).

Počasia na Slovensku ako aj vo Vysokých Tatrách sa neustále mení, ale poveternosť si zachováva určité nemeniace sa prvky. V synoptickej meteorológii ide o typy poveternostných situácií, ktoré sú charakterizované hlavne rozložením tlakových útvarov a polohou frontálneho pásma (Ballou et al., 1964), a sním súvisiace základné prúdenie vzduchu v spodnej časti troposféry (Konček et al., 1974). Dynamicko-klimatické charakteristiky výskytu dní s jednotlivými typmi počasia obsahujú štatistickú analýzu závislosti synoptických typov od teplotných pomerov vzduchu, oblačnosti, slnečného svitu, relatívnej vlhkosti, úhrnu zrážok a pravdepodobnosti výskytu búrok (Konček et al., 1974). Niektoré príbuzné typy počasia, synoptické situácie, je možné spájať do skupín (s prihliadnutím na cirkulačné pomery danej oblasti). Spojenie západných až severovýchodných (W až NE) situácií má u nás význam kvôli podobným orografickým efektom (Lapin a Tomlain, 2001).

Analýza synoptických typov je užitočný nástroj na hodnotenie vzťahu O₃ expozície, alebo ozónového príjmu, s možným poškodením lesných porastov. Napríklad Yarnal (1993) hodnotí znečisteniu ovzdušia v závislosti od meteorologických podmienok synoptických typov, a Comrie (1993) ich spája s typickými hladinami O₃ koncentrácií.

1.3 METODIKA

Meteorologický vplyv poveternostných situácií počasia na množstvo ozónu prijaté rastlinou sme zisťovali na tatranskom výškovom tranzekte výskumných plôch (Stará Lesná, Tatranská Lomnica, Štart, Deviatka, Skalnaté pleso, Lomnický štít) (Obrázok 1). Štúdiá využívala merania denných hodnôt slnečného žiarenia, teplôt a vlhkosti vzduchu, a O₃ koncentrácií na výskumných plochách počas rokov 2001- 2003.

Ozónové koncentrácie [$2.142 \text{ ug/m}^3 = 1 \text{ ppb}$ v STP podmienkach (standard temperature and pressure)] na výškovom tranzekte Vysokých Tatier boli merané systémom UV absorpcie automatickými ozónovými analyzátormi (Thermoelectron, MLU, Horiba). Automatické O₃ merania boli merané na staniciach Stará Lesná, Štart, Skalnaté pleso a Lomnický štít s celkovým prevýšením 1824 metrom počas obdobia 2001-2003. Meraniam s častými výpadkami chýbalo množstvo hodnôt (5% chýbajúcich na stanici Skalnaté pleso, 36.6%

chýbajúcich na všetkých staniciach). Chýbajúce merania na stanici Skalnaté pleso boli nahradené integráciou hodnôt ozónu lineárnym regresným modelom závislosti ozónu od slnečného žiarenia a od relatívnej vlhkosti vzduchu ($c_{O_3} = 92.518 + 0.007GR - 0.189RH$, $R^2 = 0.652$). Na základe výškového gradientu O_3 , nárast koncentrácií v priemere 2.31 ug/m^3 na 100 metrov, a O_3 hodnôt Skalnatého plesa boli chýbajúce O_3 údaje modelované aj na zvyšných staniciach Tatranského transektu.

Ozónový príjem pre ihličnaté porasty tatranského výškového transektu bol určený na základe modelovania časovým radom fyzikálnych veličín. Na dosiahnutie súvislých radov boli chýbajúce merania nahradené integrovanými. Pre výpočet vodivosti prieduchov pre ozón (mm/s) boli použité merania teploty vzduchu, modelované údaje fotosynteticky aktívneho žiarenia, a tlaku vodných pár modelom optimálnej vodivosti prieduchov pre vodnú paru integrovaným do programu porastovej fotosyntézy "Stand photosynthesis program" (Mäkelä et al., 2006). Pričom platí, že vodivosť prieduchov pre O_3 (GO_3) je rovná 0.613 násobku vodivosti prieduchov pre vodnú paru (Nobel, 1983). Pre vybrané plochy sme vypočítali potenciálny O_3 príjem do listových prieduchov stromov na základe Fickovho zákona (násobku O_3 s GO_3) (Wieser et al., 2000). Na jednej strane, potenciálny ozónový príjem do prieduchov rastlín bol vypočítaný na základe súvislého radu údajov O_3 a meteorologických parametrov počasia. Na druhej strane, bol potenciálny ozónový príjem do prieduchov rastlín vyhodnotený ako výsledok súvislého radu údajov a denných záznamov opakujúcich sa poveternostných situácií - synoptických typov.

Vypočítané hodnoty ozónového príjmu (UO_3) boli použité na rekonštrukciu vyvinutým nelineárnym regresným modelom v závislosti od teploty vzduchu (T) (rovnica 1).

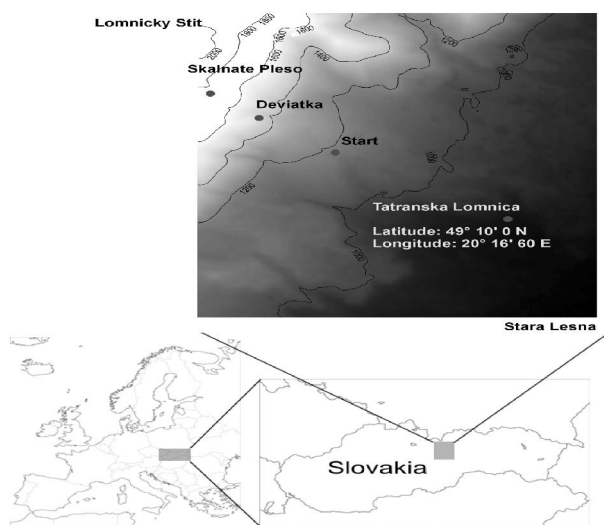
$$UO_3 = uo_{3\max} \exp \left[-0.5 \left(\frac{T - T_{opt}}{T_{tol}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

V rovnici 1 je parameter $uo_{3\max}$ maximálna hodnota ozónového príjmu dosiahnutá pri optimálnej teplote vzduchu (T_{opt}). Pričom parameter T_{tol} je tepelná tolerancia, deviácia od optima v ktorej je UO_3 60% z maxima.

Na vyhodnotenie závislosti ozónového príjmu od typov poveternostnej situácie počasia pre územie Slovenska za obdobie 2001- 2003 boli použité synoptické typy počasia podľa klasifikácie a záznamov SHMÚ. Synoptické situácie boli združené do 13 typov podľa smeru prevládajúceho prúdenia vzduchu. [Anticyklonálne situácie: A (A - centrálna anticyklóna, Ap1, Ap2, Ap3, - putujúca anticyklóna), Ea (NEa, Ea), Sa (SEa, Sa), SWa (Swa), Wa (Wa, Wac), NWa (NWa). Cyklonálne situácie: Bc (C - centrálna cyklóna, B - brázda, Bc), Nc (Nc, NWc), Ec (NEc, Ec, Cv), Sc (SEc, SWc1, WCs), SWc (SWc2, SWc3), Wc (Wc). Situácie Wa (Wa a Wac) a Barické sedlo V (Vfz)]. Vplyv synoptických typov na O_3 príjem bol vyhodnotený z hľadiska odchýlky vypočítanej hodnoty UO_3 (na základe GO_3 a O_3) a modelovanej hodnoty UO_3 (na základe nelineárneho regresného modelu podľa teploty vzduchu). Vplyv synoptických typov na O_3 príjem bol vyhodnotený z hľadiska odchýlky hodnôt UO_3 pre každý deň zvlášť, a pre 4-dňové sekvencie dní opakujúcich sa rovnakých synoptických typov (A-AAAA, Wa-WaWaWaWa, ...).

2. VÝSLEDKY

Výskumné plochy výškového transektu (Stará Lesná, Tatranská Lomnica, Štart, Deviatka, Skalnaté pleso, Lomnický štít) (Obrázok 1) boli umiestnené na južnom svahu pohoria Vysoké Tatry prevažne s ihličnatým lesným porastom borovice, smreka, smrekovca, jedle a kosodreviny (Obrázok 2). Súvislý ihličnatý les medzi stanicami Štart (jedľa 20%, smrek 80%) a Deviatka (smrekovec 20%, smrek 80%) nahrádza pásmo kosodreviny približne až do úrovne Skalnatého plesa (na viac exponovaných stanoviskách aj vyššie). Prevládajúca expozícia záujmového územia je juhovýchod 130 stupňov (SE). Najstrmšie svahy do 40 stupňov sú v oblasti medzi Skalnatým plesom a Deviatkou, nižšie položená zalesnená oblasť má priemerný sklon 15 stupňov.



Obrázok 1. Geografická poloha výskumných plôch (Stará Lesná, Tatranská Lomnica, Štart, Deviatka, Skalnaté pleso, Lomnický štít) s celkovým prevýšením 1824 metrov.



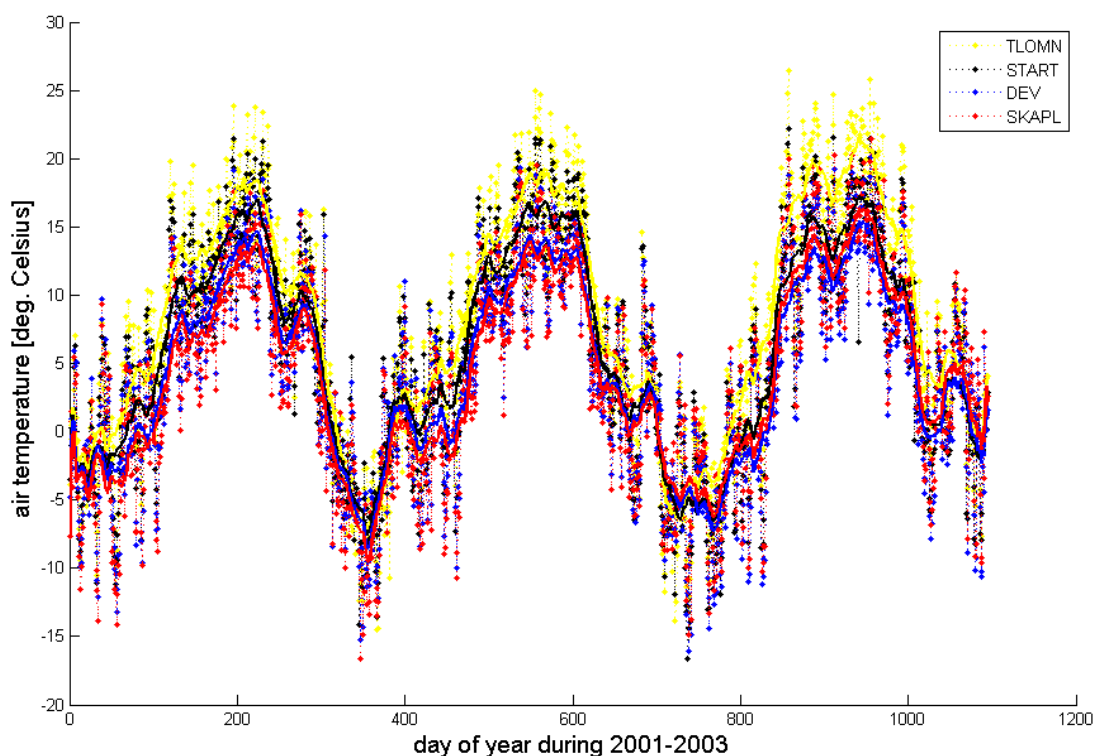
Obrázok 2. Rozmiestnenie vegetačnej a nevegetačnej plochy v blízkosti výskumných staníc krátko po výchrici v roku 2004.

2.3 ANALÝZA FYZIKÁLNYCH PARAMETROV

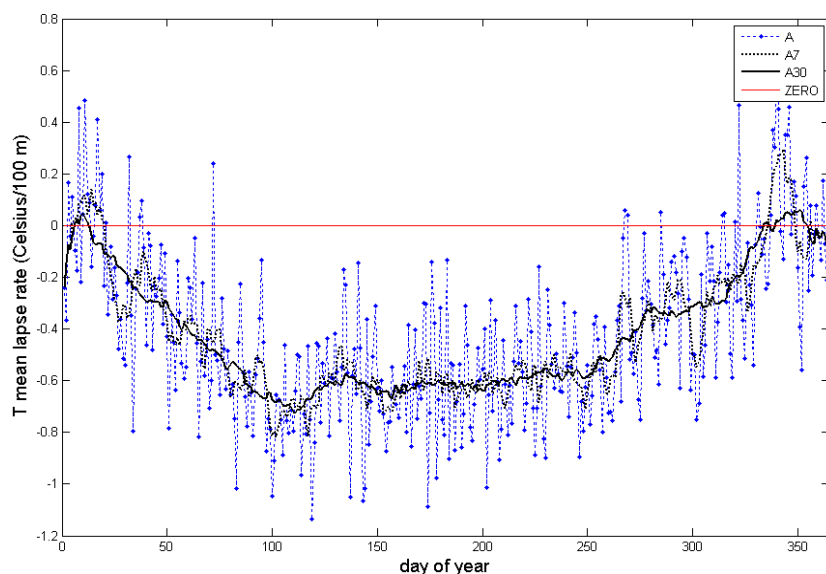
2.3.1 Teplotné podmienky výškového transektu

Typicky pre teploty zaznamenané meracím systémom Hydroclip s PT100 tepelným sensorom na Tatranskom transekte platí trend zvýšeného tepelného úbytku s narastajúcou nadmorskou výškou (Obrázok 3). Teploty v Tatranskej Lomnici sú celoročne najteplejšie, oproti najchladnejším hodnotám zo Skalnatého plesa. Pre teplejšie mesiace marec až september platil priemerný pokles teploty o 0.59 stupňov Celzia na 100 metrov zmeny nadmorskej výšky ($R^2 = 0.699$) (Obrázok 4). Pre studené zimné mesiace bola výškovotepelná závislosť minimálna (0.17 stupňov Celzia na 100 metrov, $R^2 = 0.205$). Najčastejšie v zime (v decembri a januári) sa vyskytovala mierna teplotná inverzia. Z hodnotenia medzioročnej variability bol rok 2003 najteplejším a teda najvhodnejším pre fotochémiu

ozónu. Najvyššia teplota 29.6 stupňa Celzia bola zaznamenaná 13 augusta 2003 o 14-tej hodine na stanici Tatranská Lomnica. Naopak najnižšia teplota -22.9 stupňa Celzia bola zaznamenaná 13 decembra 2001 na stanici Skalnaté Pleso. Najteplejší mesiac bol pre všetky stanice august v priemere od 13.9 do 19.0 stupňov Celzia. Naopak najchladnejší mesiac bol január s priemernou teplotou -3.5 stupňov Celzia. Na stanici Štart boli celoročné maximá v okolí 8.9 stupňa Celzia a celoročné minimá približne 1.7 stupňa Celzia. Rozdiel 7 stupňov Celzia medzi priemerným maximom a priemerným minimom bol takmer konštantný počas celého roka (Obrázok 5). V priemere 3.1 ± 1.8 stupňa Celzia bol rozdiel medzi denným priemerom a priemerným maximom, a 4.1 ± 1.8 stupňa Celzia bol rozdiel medzi denným priemerom a priemerným minimom. Rozdiely medzi teplotným minimom a maximom nevykazujú sezónnu premenlivosť. Naopak a typicky, hodnoty teplôt silno podliehajú letnému maximu a zimnému minimu. Sezónne sa mení nielen teplota, ale aj čas výskytu denných miním a maxím. Denné maximá sa vyskytovali v zime okolo 10-tej hodiny (v priemere 4 stupne Celzia) a v lete približne o 13-tej hod. (v priemere 16 stupňov Celzia). Denné minimá oscilovali medzi 4 hod. v zime (v priemere -4 stupne Celzia) a 7 hod. v lete (v priemere 8 stupňov Celzia).



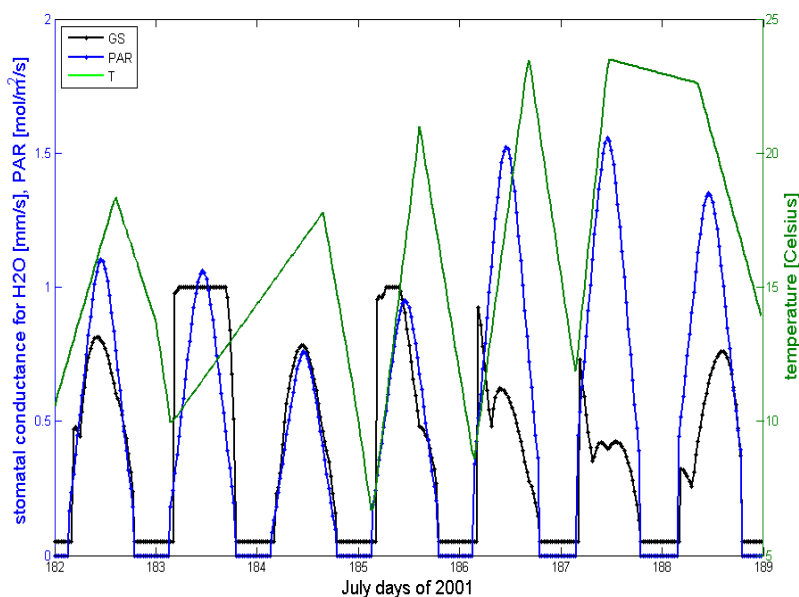
Obrázok 3. Medziročný chod teplôt vzduchu (air temperature) na staniciach výškového transektu Tatranská Lomnica (TLOMN), Štart (START), Deviatka (DEV), a Skalanaté Pleso (SKAPL) pre dni obdobia 2001-2003. Čiary znázorňujú 30 dňový kľzavý T priemer.



Obrázok 4. Denná variácia priemernej teplotnej zmeny stupňov Celzia na 100 metrov rastúcej nadmorskej výšky (T mean lapse rate, A) v období 2001-2003. Hodnoty A7 sú 7 dňové kľzavé priemery A hodnôt, a A30 sú 30 dňové kľzavé priemery A hodnôt.

2.3.2. Priepustnosť prieduchov pre O_3 (G_{O_3} , mm/s)

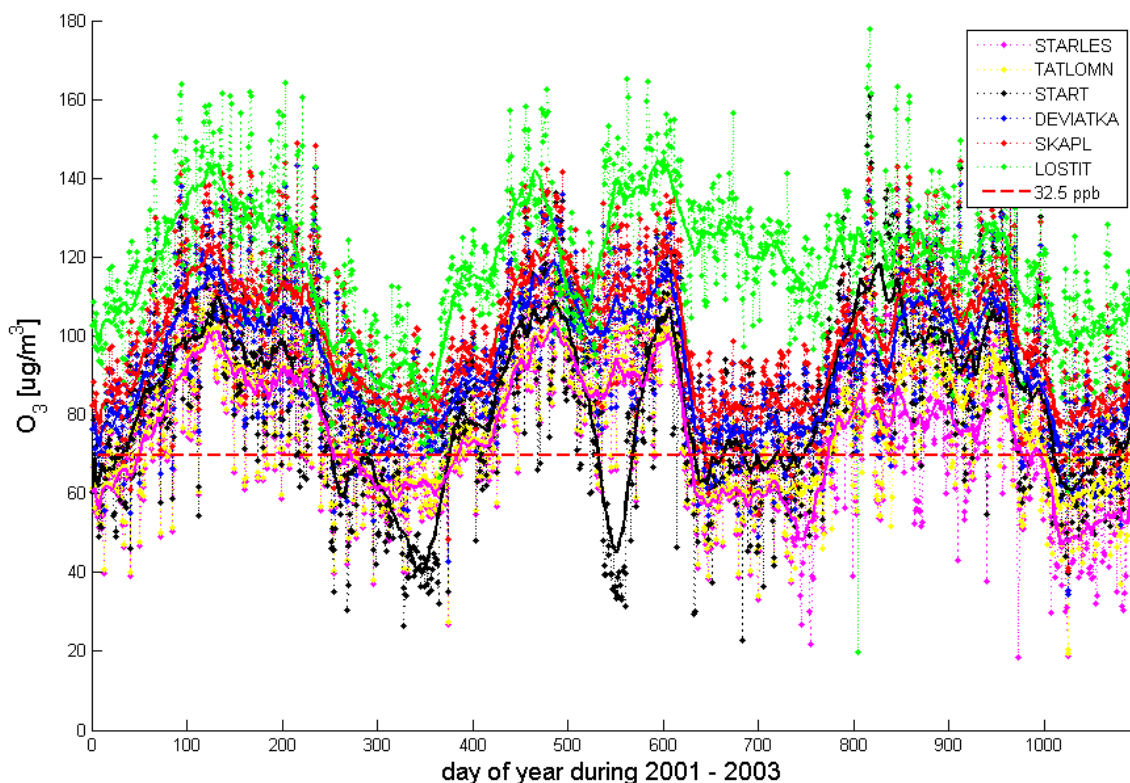
Vodivosť prieduchov sa udáva sa v mm/s a predstavuje pomer transpirácie (vyjadrenú pre list v $\text{mgH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}$) ku deficitu tlaku vodných pár (vyjadrenú v $\text{gH}_2\text{O}/\text{m}^3$). Vodivosť prieduchov klesá pri vyšších teplotách a slnečnom žiarení, a naopak s miernym ochladením a oblačnosťou rastie (Obrázok 6). Priepustnosť prieduchov pre ozón (G_{O_3}) je rovná 0.613 násobku G_{H_2O} a udáva sa v mm/s. Minimálna hodnota G_{O_3} bola v zimných mesiacoch blízka 0.05 mm/s s typickým letným nárastom na 0.35 mm/s v Tatranskej Lomnici a až na 0.45 mm/s na vyššie položenú stanicu Deviatka. Typická hladina priepustnosti ozónu v Tatranskej Lomnici bola v lete 2003 o 0.05 až 0.1 mm/s vyššia ako počas predchádzajúcich rokov. Zvýšenie teploty ako ani zvýšenie G_{O_3} sa neprejavilo na vyššie situovaných staniaciach.



Obrázok 5. Porovnanie polhodinového chodu interpolovaných hodnôt nameraných denných teplotných miním a maxím (temperature), modelovaného fotosynteticky aktívneho žiarenia (PAR) a vodivosti prieduchov pre vodnú paru (stomatal conductance for H_2O) na stanici Štart počas siedmich júlových dní 2001.

2.3.3. Ozónové koncentrácie na výškovom tranzekte (O_3 , $\mu g/m^3$)

Automatickým O_3 meraniam zaznamenaným na staniciach Stará Lesná, Štart, Skalnaté pleso a Lomnický Štít s celkovým prevýšením 1824 metrom počas obdobia 2001-2003 chýbalo množstvo hodnôt (5% chýbajúcich na stanici Skalnaté pleso, 36.6% chýbajúcich na všetkých staniciach). Chýbajúce merania na stanici Skalnaté pleso boli nahradené integráciou hodnôt ozónu lineárnym regresným modelom závislosti ozónu od slnečného žiarenia a od relatívnej vlhkosti vzduchu ($c_{O_3} = 92.518 + 0.007GR - 0.189RH$, $R^2 = 0.65$). Na základe výškového gradientu O_3 koncentrácií v priemere $2.31 \mu g/m^3$ na 100 metrov a O_3 hodnôt Skalnatého plesa boli chýbajúce O_3 údaje modelované aj na zvyšných staniciach Tatranského tranzecktu (Obrázok 8). Z dostupných meraní O_3 boli zrejmé celoročne extrémne vysoké koncentrácie na celom výškovom tranzekte Vysokých Tatier. Z najúplnejších údajov denných O_3 koncentrácií z obdobia rokov 2001 až 2003 zo Skalnatého plesa takmer polovica denných ozónových priemerov (96%) prekračovalo 24-hodinový priemer 32,5 ppb stanovený ako denný imisný limit pre ochranu vegetácie. V letných podmienkach typicky priaznivých pre fotochemickú O_3 tvorbu hodnoty poklesly z májového maxima $136 \mu g/m^3$ na výnimočné júlové minimum $32 \mu g/m^3$. Letný pokles O_3 v roku 2002 sa na Skalnatom plese prejavil najmiernejšie (max $133 \mu g/m^3$ na min $80 \mu g/m^3$).



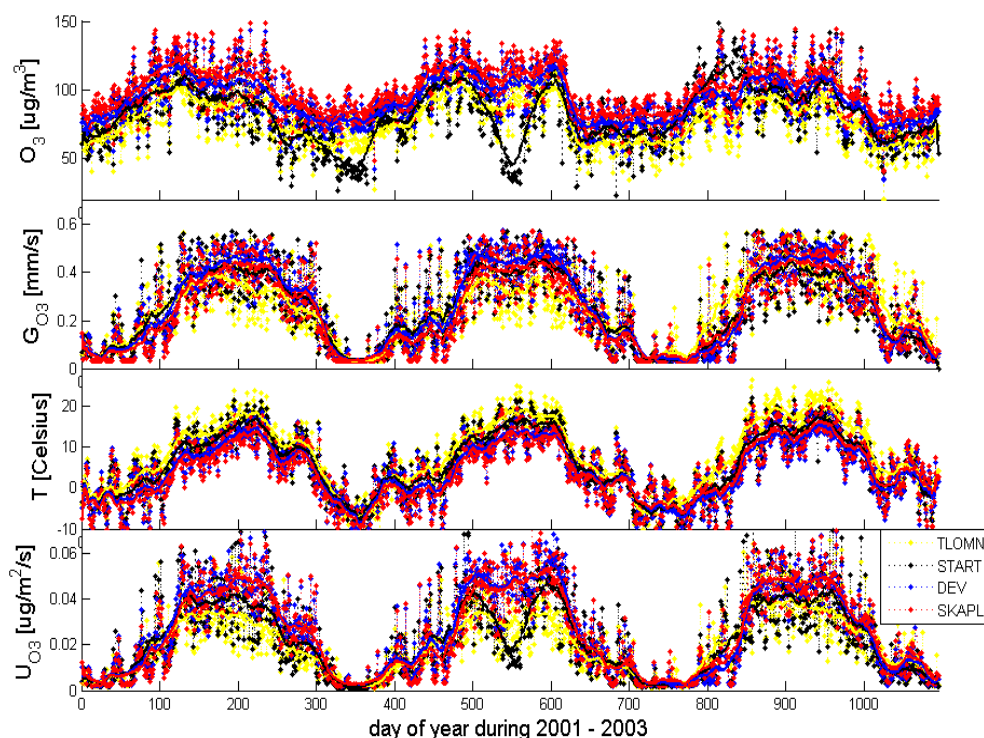
Obrázok 6. Namerané denné hodnoty ozónu (O_3 , ppb) a integrované O_3 hodnoty pre chýbajúce merania na výskumných staniciach počas obdobia 2001-2003. Čiary znázorňujú 30 dňový kĺzavý O_3 priemer. Hladina 32.5 ppb je denný limit O_3 na ochranu vegetácie.

2.3.4. Akumulovaná expozícia ozónu nad hodnotou 40 ppb (AOT40, ppb)

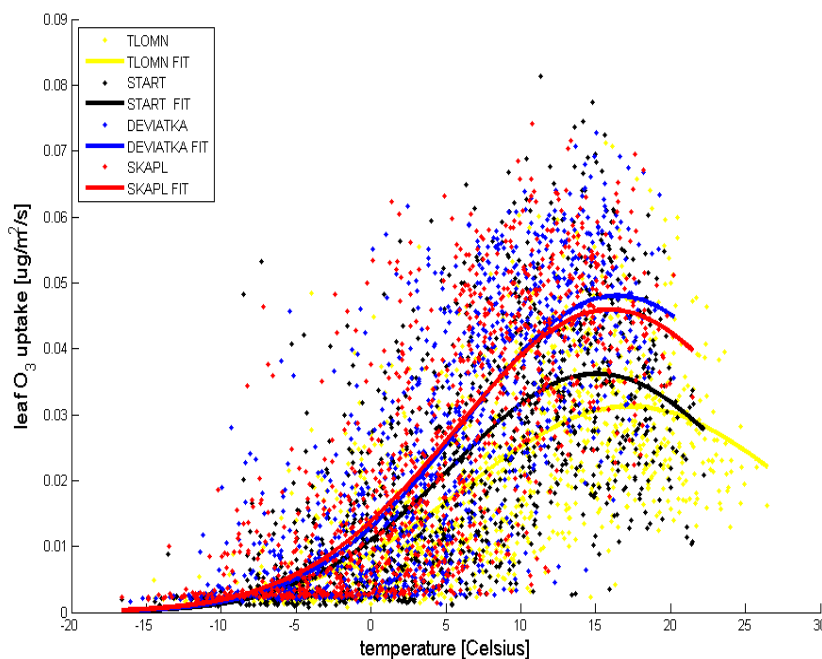
Index AOT40 je akumulovaná expozícia ozónu nad hodnotou 40 ppb (suma hodinových koncentrácií O_3 prekračujúcich 40 ppb), pre každú hodinu so slnečným žiarením $>50 \text{ Wh/m}^2$, počas vegetačného obdobia od 1. apríla do 30. septembra (Directive 2002/3/EC). Správny výpočet indexu AOT40 predpokladá nepretržité hodinové merania O_3 , preto chýbajúce údaje boli nahradené integrovanými. Typicky ako ozónové koncentrácie aj hodnota ročného priemeru indexu AOT40 stúpa s nadmorskou výškou. V Tatranskej Lomnici dosiahla hodnota AOT40 10 000 ppbh na konci vegetačnej sezóny. Na staniciach Štart, Deviatka, Skalnaté pleso a Lomnický Štít bola táto hranica prekročená už v prvej polovici vegetačného obdobia v priemere v dňoch 198, 154, 143, a 126 (17.7., 3.6., 23. 5., a 6.5.). Celkovo, na konci stanoveného vegetačného obdobia AOT40 v priemere dosahoval 8857 ± 3467 ppb v Starej Lesnej, 10532 ± 1821 ppb v Tatranskej Lomnici, 15438 ± 2773 ppb na Štarte, 23295 ± 3001 ppb na Deviatke, 29272 ± 3212 ppb na Skalnaté pleso a 46262 ± 5218 ppb na Lomnickom Štíte.

2.3.5. Potenciálny príjem ozónu do vegetácie na výškovom tranzekte (UO_3 , $\mu\text{g/m}^2/\text{s}$)

Príjem ozónu (UO_3) do ihlíc stromov bol vypočítaný na základe Fickovho zákona (násobku O_3 s GO_3). Pre UO_3 platil typicky sezónny charakter (Obrázok 10). Priemerné denné hodnoty UO_3 vystúpili z $0.02 \mu\text{gO}_3/\text{m}^2/\text{s}$ zo začiatku vegetačnej sezóny až na $0.06 \mu\text{gO}_3/\text{m}^2/\text{s}$ v lete. Približne $0.03 \mu\text{gO}_3/\text{m}^2/\text{s}$ tvorilo letné rozhranie UO_3 medzi stanicami Stará Lesná a Lomnický Štít. Denný príjem ozónu na začiatku vegetačnej sezóny bol na hladine od $0.8 - 1.2 \text{ mgO}_3/\text{m}^2$ a kumulatívny UO_3 vzrástol z tejto hladiny ku koncu vegetačnej sezóny na úroveň 270 až $420 \text{ mgO}_3/\text{m}^2$. Priebeh kumulatívnych hodnôt O_3 príjmu a kumulatívnych hodnôt O_3 koncentrácií AOT40 bol pozitívne silne závislý ($R^2 = 0.99$). Rovnako ako UO_3 , aj procesy vodivosti prieduchov a menej výrazne aj stavu ozónovej hladiny v ovzduší vykazovali sezónny nárast s rastom teploty v teplom polroku a ich poklesom v chladnom polroku (Obrázok 7). Zimné hodnoty O_3 , GO_3 , T a UO_3 sú približne rovnaké na celom tranzekte, pričom výraznejšie rozdiely nastávajú po ukončení prudkého jarného nárastu (marec- apríl) a následnej letnej stabilizácii (máj, jún, júl). Typicky nasleduje prudký pokles hodnôt neskorého leta a začiatku zimy. Hodnoty O_3 v priemere spravidla vystúpili z 50 na $100 \mu\text{g/m}^3$, hodnoty GO_3 z 0.1 na 0.6 mm/s, a teploty vzduchu z -10 na viac ako 20 stupňov Celzia. Rýchlosť zmien hodnôt O_3 , GO_3 , UO_3 , a T vykazovala spravidla sezónny ale nerovnomerný rast alebo pokles. Zmeny denných teplôt vzduchu boli častejšie sprevádzané zmenou koncentrácií O_3 v porovnaní s oneskorenými zmenami GO_3 a UO_3 . Rýchlosť ozónového príjmu so zrýchľovaním otepľovania rástla približne do 150 dňa roka, do konca apríla a začiatku mája. Od 150 dňa rýchlosť UO_3 klesala priemerne až do konca vegetačnej sezóny 273 dňa (koniec septembra-záčiatoč októbra). Zvýšenie teplôt vzduchu exponenciálne zvýšilo ozónový príjem až po maximá $0.031 - 0.046 \mu\text{g/m}^2/\text{s}$ pri optimálnych teplotách v okolí 15 až 17 stupňov Celzia, pričom 60% maximum UO_3 spadalo do teplotnej odchýlky 10 stupňov od optima (Obrázok 30). Nelineárny regresný model ozónového príjmu a teploty vzduchu vysvetľoval v priemere 74% variácie.



Obrázok 7. Medziročný chod denných ozónových koncentrácií (O_3), vodivosti prieduchov pre O_3 (GO_3), teploty vzduchu (T), a potenciálny príjem ozónu do vegetácie (UO_3) na staniciach Tatranská Lomnica (TLOMN), Štart (START), Deviatka (DEV), Skalnaté pleso (SKAPL) počas obdobia 2001-2003. Čiary znázorňujú 30 dňový kľzavý O_3 priemer.

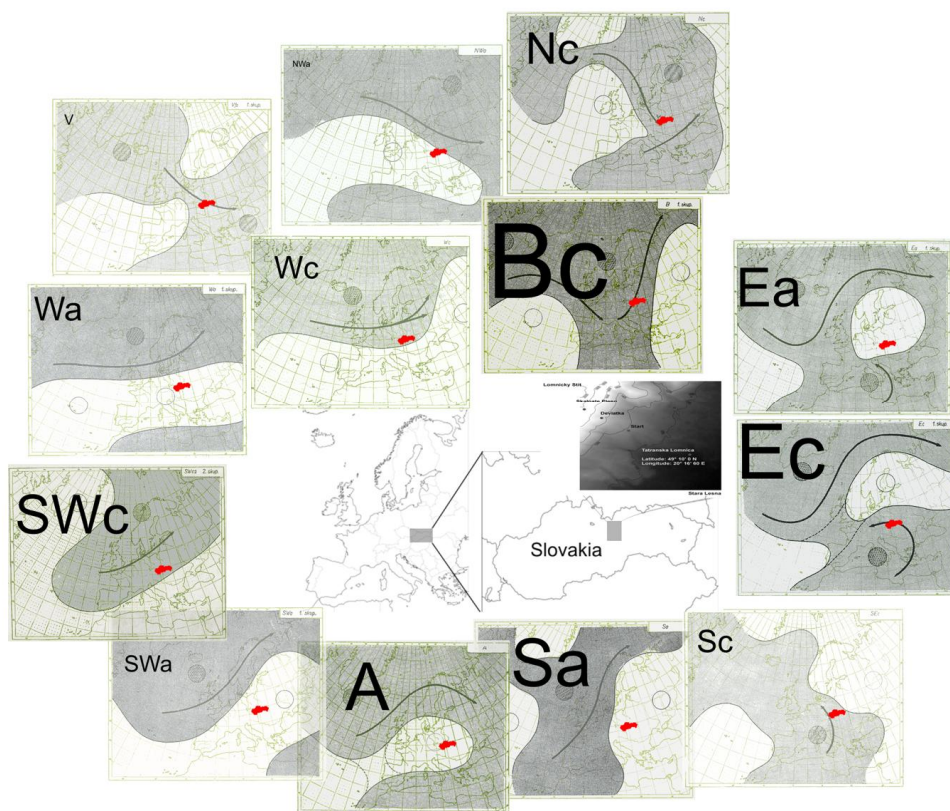


Obrázok 8. Závislosť priemerného denného ozónového príjmu do vegetácie (leaf O_3 uptake) od teploty vzduchu (temperature) pre stanice Tatranská Lomnica (TLOMN, $y = 0.0313EXP[-0.5((x-17.29)/10.98)^2]$, $R^2 = 0.68$), Štart (START, $y = 0.0362EXP[-0.5((x-15.09)/9.75)^2]$, $R^2 = 0.67$), Deviatka (DEVIATKA, $y = 0.048EXP[-0.5((x-16.43)/10.13)^2]$, $R^2 = 0.79$), a Skalnaté pleso (SKAPL, $y = 0.0459EXP[-0.5((x-15.93)/10.27)^2]$, $R^2 = 0.79$) počas obdobia 2001-2003.

2.4. ANALÝZA POVETERNOSTNÝCH SITUÁCIÍ - SYNOPTICKÝCH TYPOV (ST)

2.4.1. Výskyt synoptických typov

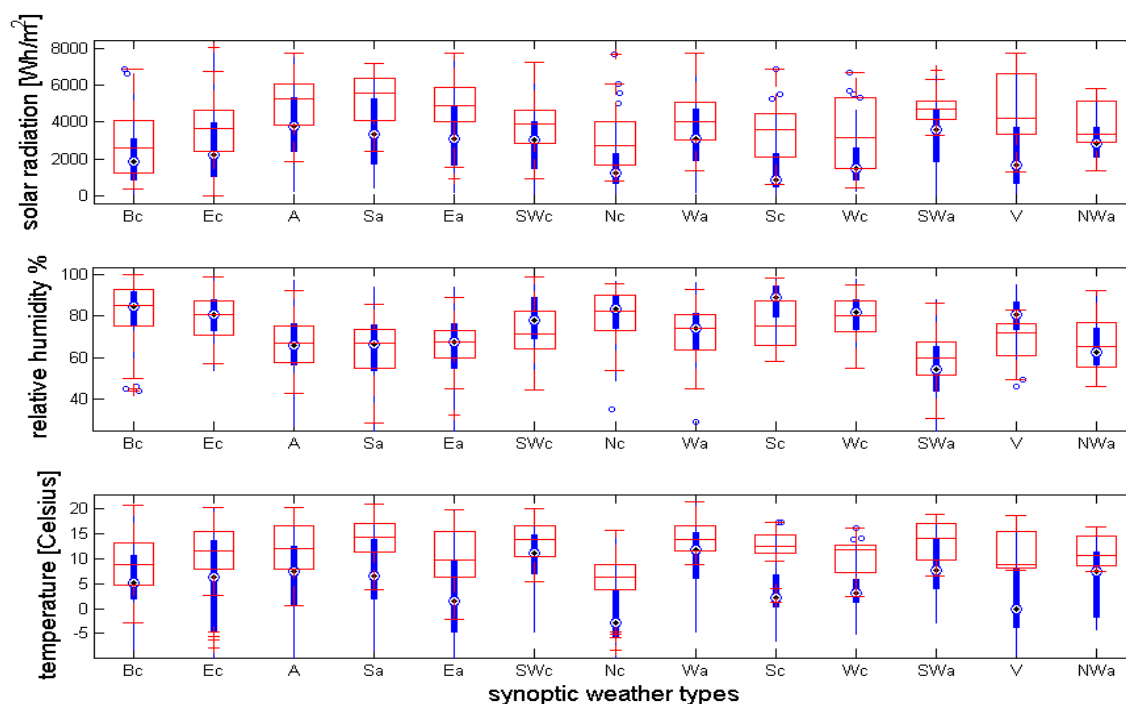
Dennú klasifikáciu typov poveternostných situácií pre Slovensko vykonáva a zverejňuje Slovenský hydrometeorologický ústav. Celkovo sa rozlišuje 25 základných typov (SHMÚ, Zítek et al., 1967), ktoré boli v našej štúdii združené na 13. Kritériom združenia boli podobné smery prúdenia cyklón a anticyklón na naše územie. Prehľad tlakových vzdušných útvarov nad Európou a ročný výskyt najčastejšie sa opakujúcich (synoptických) poveternostných situácií znázorňujú synoptické mapy (Obrázok 9). Cyklonálne počasie nižšieho tlaku prevládalo počtom (60%) nad anticyklonálnym počasím s vyšším tlakom (40%). Celoročne najčastejší synoptický typ bola cyklóna B - Brázda nízkeho tlaku nad strednou Európou vyskytujúci sa priemerne 62 dní (17%). Druhý najzastúpenejší typ v počte 46 dní (13 %) bola Východná cyklonálna situácia - Ec. Slnečné počasie z juhozápadu (A - Anticyklóna nad Strednou Európou) sa celoročne vyskytlo v priemere 40 dní (11 %). Rovnako početná a slnečná bola aj SA-Južná anticyklóna.



Obrázok 9. Synoptické mapy 13 typov poveternostných situácií usporiadané podľa smeru prevládajúceho prúdenia vzduchu (N - E - S - W), a rozmiestnenie tlakových útvarov (cyklóna - c, a anticyklóna - a) nad Európou a Slovenskom (červená plôška). Veľkosť písmen označenia synoptického typu úmerne odpovedá jeho ročnému výskytu (Bc 17%, Ec 13%, A 11%, Sa 11%, SWc 9%, Ea 9%, Nc 7%, Wa 6%, Sc 5%, Wc 5%, SWa 4%, V 2%, a NWa 1%).

2.4.2. Meteorologické charakteristiky synoptických typov na výškovom tranzekte

Typicky slnečnejšie počasie v priemere o 1000 Wh/m² viac žiarenia sa vyskytovalo počas dní teplejšieho ako počas dní chladnejšieho polroka (Obrázok 10). Rovnaký rozdiel 1000 Wh/m² bol v priemere nameraný aj medzi anticyklónami a cyklónami. Najviac dopadajúceho slnečného žiarenia takmer 4000 Wh/m² bolo priemerne zaznamenané počas trvania anticyklonálnych poveternostných typov z juhu A a Sa. Práve Sa zvýšila svoje letný GR priemer až o 1800 Wh/m², ale rovnaký nárast sa prejavil aj počas Sc. Slnečné počasie je sprevádzané nižšou relatívnou vlhkosťou 70% v priemere pre A, Sa, Ea, a viac ako 80% pre Bc - Brázdou nízkeho tlaku nad strednou Európou, Ec, a Nc. Významné letné zvýšenie žiarenia počas situácie Sc bolo rovnako sprevádzané 10% poklesom relatívnej vlhkosti, a tiež trojnásobným oteplením vzduchu z 3.7 na 12.1 stupňa Celzia. Najteplejšia Wa mala v priemere 14 stupňov Celzia. Všeobecne, rozdiel medzi ročným a letným teplotným priemerom bol 6 stupňov Celzia.

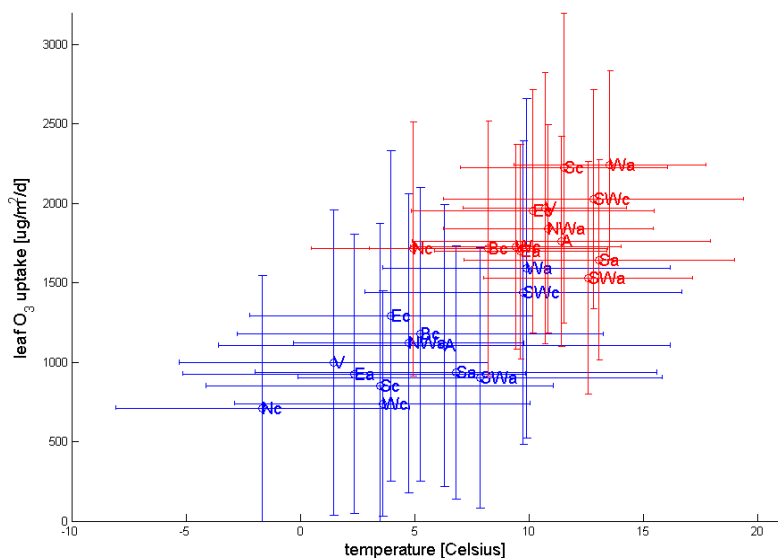


Obrázok 10. Boxy teplôt (temperature), vlhkosti vzduchu (relative humidity), a slnečného žiarenia (solar radiation) synoptických typov (ST, synoptic weather types) pre celé obdobie (modré) a vegetačnú sezónu (červené) rokov 2001- 2003. Zoradenie ST od napočetnejších z ľava do prava k menej početným. Prehľad ST je na obrázku 31.

2.4.3. Ozónová situácia pre synoptické typy na výškovom tranzekte

Priemerný teplotný rozdiel medzi celoročne najchladnejším a najteplejším typom počasia Nc a Wa je 11 stupňov Celzia (Obrázok 11). Celoročne priemerný denný rozdiel v ozónovom príjme rovnako medzi Nc a Wa je 900 ug/m²/d. Okrem výrazne najchladnejšieho typu (Nc) a najteplejších typov (Wa, SWc) s najnižším a s najvyšším UO₃, sa celoročne

rozlišovali skupiny chladnejších typov s nižším UO_3 (V, Ea, Sc, Wc) a skupiny teplejších typov združených okolo celoročného teplotného priemeru 5 ± 7 stupňov Celzia a UO_3 priemeru $1000 \pm 1000 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ (Ec, Bc, NWa, A, Sa, SWa). Počas vegetačného obdobia bol typický posun zoskupenia ST do vyšších teplôt a vyššieho ozónového príjmu (v priemere 11 ± 5 stupňov Celzia a $1800 \pm 800 \text{ ug/m}^2/\text{d}$). Paradoxne najnižšie UO_3 v priemere $1600 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ vo vegetačnej sezóne patria pomerne najteplejším synoptickým typom (Sa, SWa) okolia 13 stupňov Celzia. Ide o ST s vysokými hladinami letných O_3 koncentrácií v priemere 105 ug/m^3 , avšak vysoká teplota inhibuje otváranie prieduchov a tým znižuje príjem O_3 . Najpočetnejšie ST leta Bc, A vykazovali podpriemerný UO_3 1700 ug/m^3 .



Obrázok 11. Závislosť denných súm ozónového príjmu (leaf O_3 uptake) od teploty vzduchu (temperature) v priemere pre celý tatranský transekt a jednotlivé synoptické typy (ST). Modré - celoročné, Červené - vegetačné. Rozsah chýb je priemerná smerodajná odchýlka. Prehľad ST na obrázku 31.

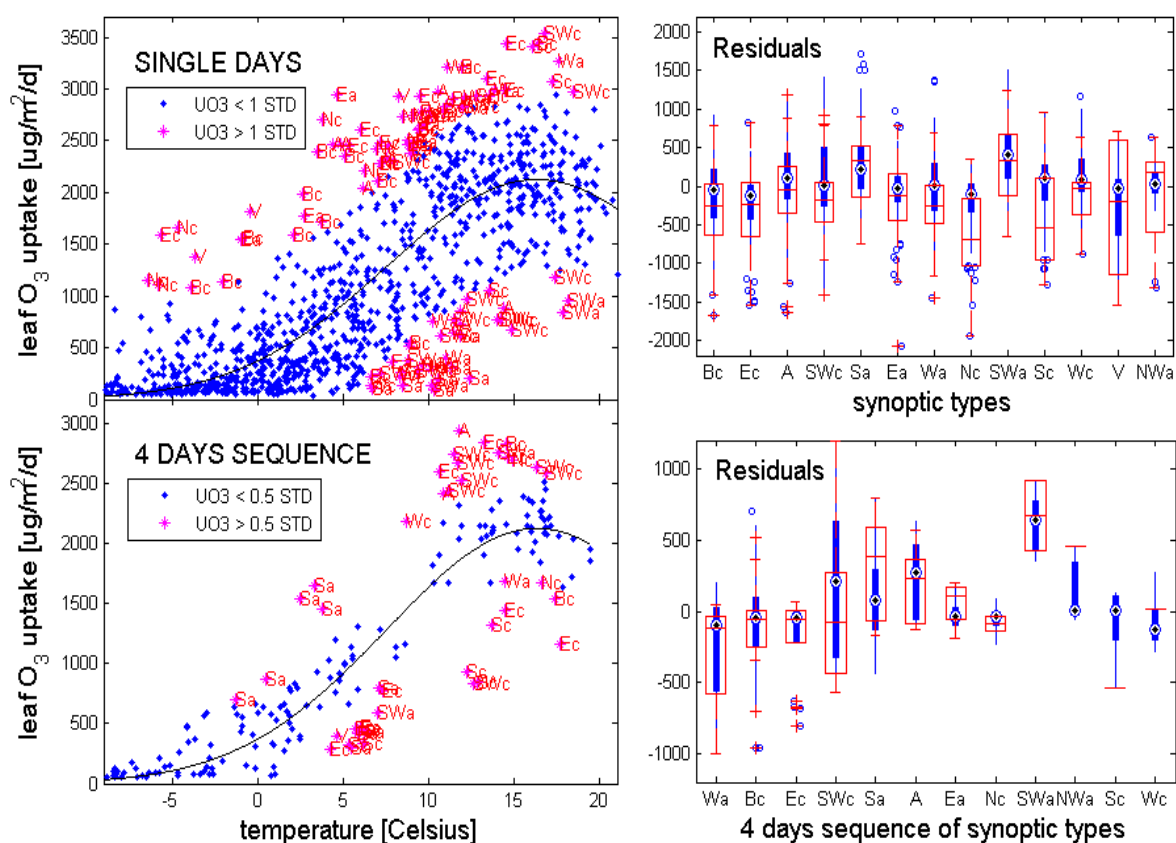
Priemerná maximálna hladina UO_3 všetkých ST je $1500 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ pri teplote 18.6 stupňa Celzia. Podľa nelineárnych regresných modelov sú maximálne hodnoty UO_3 pre cyklonálne situácie v priemere $1700 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ dosahované pri teplote 19.0 stupňov Celzia, pričom typicky teplejšie anticyklonálne situácie dosahujú v priemere o $500 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ nižšie maximálne ozónové príjmy a to pri nižšej optimálnej teplote 18.0 stupňov Celzia.

Najvyššie maximálne UO_3 2300 a $1900 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ pripadajú na zriedkavé ST Sc a V s celoročným výskytom 5% a menej, avšak maximálne UO_3 najčastejších cyklonálnych ST Bc a Ec s výskytom 17 a 13% sú tiež nadpriemerné 1650 a $1750 \text{ ug/m}^2/\text{d}$. Častá anticyklonálna situácia A s výskytom až 11% je naopak charakteristická vysokým teplotným optimom 22 stupňov Celzia a nízkym max ozónovým príjmom $1250 \text{ ug/m}^2/\text{d}$. Pomerne zriedkavá 7% výskytu, chladná ale O_3 najmenej znečistená Nc dosahuje tiež vysoké max UO_3 $1600 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ pri 21 stupňoch Celzia.

Porovnanie modelov nelineárnej závislosti UO_3 od teploty vzduchu, a boxy zvyškov modelu a hodnôt UO_3 pre synoptické typy jednotlivo a 4-dňové sekvencie znázorňuje obrázok 12.

Parametre modelu UO_3 a teploty pre ST jednotlivo a 4-dňové sekvencie sú takmer identické (max UO_3 2126 a $2162 \text{ ug/m}^2/\text{d}$, optimálna teplota 16.3 a 15.5 stupňov Celzia). Odchýlky od modelovej hodnoty UO_3 (rovnako ako len odchýlky väčšie ako jeden násobok smerodajnej odchýlky) pre ST jednotlivo predstavujú pozitívnu zmenu voči modelu najmä počas situácií Nc, Sc v jarnom a Bc, Ec, SWc v teplejšom období. Negatívne odchýlky hodnôt UO_3 sa naopak vyskytujú najčastejšie počas trvania ST Sa, SWa a čiastočne A. Typicky sa prejavilo zvýšenie UO_3 priemerne o $1/4$ u všetkých synoptických typov zo

zvyšujúcou sa teplotou v letnom období s výnimkou mierneho poklesu iba u Sa a NWA. Jednotlivo medzi ST balancujú odchýlky okolo modelových hodnôt, avšak odchýlky 4-dňových sekvencií ST sú extrémne špecifické. Najčastejšou 4-dňovou sekvenciou ST v letnom období bola Wa s nárastom UO_3 100 až $1000 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ od modelovej hodnoty. Naopak 4-dňové sekvencie ST A a Sa sa vyznačovali zníženým ozónovým príjmom o 500 až $700 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ od modelovej hodnoty. Rovnako aj 4-dňová sekvencia SWa extrémne znižovala UO_3 o 300 až $800 \text{ ug/m}^2/\text{d}$, avšak len veľmi zriedkavo (2 až 3% výskytu). Anticyklóny výraznejšie znižovali modelové UO_3 hodnoty v prípade modelovania so 4-dňovými sekvenciami synoptických typov. Juhozápadná anticyklóna SWa počas sekvencie znížila modelový UO_3 v priemer o $625 \text{ ug/m}^2/\text{d}$. Naopak, ku zvyšovaniu modelového ozónového príjmu o $260 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ prispela smerom prúdenia blízka sekvencia Západnej anticyklóny Wa. Oproti ročnému UO_3 sú najviac zvýšené hladiny UO_3 o $1000 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ v letných mesiacoch 4-dňových sekvencií ST Sa, A, Ea. Vysoký UO_3 sa u 4-dňovej sekvencii A nezvyšuje ale klesá v priemere až o $200 \text{ ug/m}^2/\text{d}$. Klesajúca tendencia UO_3 až do $-450 \text{ ug/m}^2/\text{d}$ sa tiež prejavila počas jednotlivých dní 4-dňovej sekvencie Bc.



Obrázok 12. Model nelineárnej závislosti ozónového príjmu (leaf O_3 uptake, UO_3) od teploty vzduchu (temperature), a boxy zvyškov (Residuals) modelu a hodnôt UO_3 pre synoptické typy (ST). Hodnoty denných súm UO_3 väčšie a menšie ako 1 násobok smerodajnej odchýlky (STD) pre jednotlivé dni (Single days), UO_3 väčšie a menšie ako 0.5 násobok STD pre 4 dňové sekvencie rovnakých synoptických typov (ST, 4 days sequence of synoptic types). Hodnoty UO_3 pre celé obdobie (modré boxy) a vegetačnú sezónu (červené boxy) 2001- 2003 v priemere pre tatranský transekt. Zoradenie ST od napočetnejších počas teplého polroka z ľava do prava k menej početným.

3. DISKUSIA A PRÍNOS O₃ PRÍJMU

Zvýšené koncentrácie troposférického ozónu, O₃ stres, a následné O₃ poškodenia lesných drevín predstavujú spoločenský problém, ktorý vyžaduje riešenie. Keďže O₃ stres a poškodenie rastliny vychádza z porušenia rovnováhy medzi ozónovým príjmom a O₃ detoxikáciou vnútri listového mezofylu, riešenie ozónového problému cestou kvantifikovania akumulácie O₃ do listových pletív predstavuje kvalitnejší odhad fyziologických zmien rastlín, oproti v súčasnosti používanému indexu AOT40.

Výsledky tejto štúdie sú v zhode s výsledkami prác podobného zamerania.

Modelovanie v našej štúdii využíva priamo nelineárnu závislosť ozónového príjmu od teploty, čím sa líši od Wieser et. al. (2000) a Emberson et. al. (2000a) ktorý modelovali len O₃ vodivosť prieduchov. Odchýlky od modelových hodnôt ukazovali trend pre synoptické typy. Maximálne ozónové príjmy pre cyklónálne situácie sú vyššie a dosahované pri vyššej teplote, pričom typicky teplejšie anticyklónálne situácie dosahujú nižšie maximálne hodnoty UO₃ a to pri nižšej optimálnej teplote.

Detoxikácia O₃ u rastlín znižuje fixáciu uhlíka a mení spôsob alokácie optimálneho využitia dostupného uhlíka do rozličných rastlinných pletív (Taylor 1994). Ozón spôsobuje redukcie v čistej fotosyntéze a redukcie v koreňovom/vrcholcovom pomere na úkor koreňového rastu (McLaughlin et al. 1994, Pell et al. 1994). Správny odhad O₃ príjmu do rastlinných pletív umožňuje predpokladať následnú detoxikáciu O₃, degradačné zmeny v listových pletivách, redukciu čistej fotosyntézy, a zníženie koreňového rastu a statickej stability porastov. Redukcia čistej fotosyntézy pozorovaná podľa Wieser (1997) na jednoročných ihliciach smreka a borovice limby centrálnych Álp predstavuje 10% až 40% redukciu pri hodnotách kumulatívneho UO₃ od 15 do 40 mmol/m². Použitím rovnakého modelu pre tatranské kumulatívne ozónové príjmy, menej ako 10 mmol/m² UO₃ za sezónu predstavuje menej ako 5% redukciu čistej fotosyntézy.

Znížený koreňový rast znižuje statickú stabilitu stromov, a môže prispieť k zvýšenej náchylnosti porastov ku vyvráteniu prudkým vetrom. Kvantifikácia degradačných zmien v listových pletivách, redukcie koreňového rastu a statickej stability porastov si vyžaduje ďalší výskum.

Na základe súčasných výskumov sú dostupné hodnoty O₃ príjmu využiteľné pre určenie redukcie čistej fixácie uhlíka, a akumulácie biomasy. Hodnoty O₃ príjmu sú potrebné pre nové štúdie detoxikačnej O₃ kapacity s určením hladín výskytu degradačných listových zmien, a tiež pre nové štúdie koreňového rastu a porušenia statickej stability porastov. Pri správnom určení výskytu trvalých degradačných listových a statických zmien je vhodné posúdiť túto informáciu z hľadiska predčasnej obnovy porastov ako prostriedku pre zabezpečenie existencie zdravého lesa.

POĎAKOVANIE

Ďakujem najmä mojim kolegom za profesionálny a zároveň priateľský prístup, metodické rady, a hlavne za poskytnutie materiálu na realizáciu štúdie. Ďakujem za čiastočné financovanie tejto práce z projektu APVV 0456 - 07.

4. LITERATÚRA

- Baldocchi, D. D., R. J. Luxmoore, and J. L. Hatfield. 1991. Discerning the forest from the trees: an essay on scaling canopy conductance. *Agricultural Forest Meteorology* 54:197-226
- Ballon L., Forgáč P., Molnár F. 1964: Počasie na území Slovenska za typických poveternostných situácií. Hydrometeorologický ústav, Praha, 30str.
- Bičárová, S., Fleischer, P., 2007. Changes of ground level ozone concentration after the 19 November 2004 windstorm in the High Tatras. *Zborník Pokalamitný výskum v TANAP-e 2007*, Tatranská Lomnica, 25. - 26.10. 2007, Geofyzikálny ústav SAV, ISBN: 978-80-85754-17-9
- Comrie A.C., 1994: A synoptic climatology of rural ozone pollution at three forest sites in Pennsylvania. *Atmospheric Environment*, 28 (9), pp. 1601-1614.
- Embersson L.D., Wieser G., Ashmore M.R., 2000: Modelling of stomatal conductance and ozone flux of Norway spruce: Comparison with field data. *Environmental Pollution*, 109 (3), 393-402.
- Fredericksen, T.S., Kolb, T.E., Skelly, J.M., Steiner, K.C., Joyce, B.J., Savage, J.E., 1996. Light environments alters ozone uptake per net photosynthesis rate in black cherry trees. *Tree Physiology* 16, 485-490.
- Fuhrer, J., Skärby, L., Ashmore, M.R., 1997. Critical levels of ozone effects in Europe. *Environmental Pollution* 97, 18-29.
- Günthardt-Goerg, M.S., McQuattie, C.J., Maurer, S., Frey, B., 2000. Visible and microscopic injury in leaves of five deciduous tree species related to current critical ozone levels. *Environmental Pollution* 109, 489-500.
- Heath, R.L., 1994. Alteration in plant metabolism by ozone exposure. In: Alscher, R., Wellburn, A.R. (Eds.), *Plant Response to the Gaseous Environment*. Chapman and Hall, London, 121-145.
- Kivimäenpää, M., Jönsson, A. M., Stjernquist, I., Sellden, G., Sutinenen, S., 2004. The use of light and electron microscopy to assess the impact of ozone on Norway spruce needles. *Environmental Pollution* 127, 441-453
- Konček M., Bohuš I., Briedoň V., Chomicz K., Intribus R., Kňazovický L., Kolodziejek M., Kurpelová M., Murínová G., Myczkowski S., Orlicz M., Orliczowa J., Otruba J., Pacl J., Peterka V., Petrovič Š., Plesník P., Pulina M., Smolen F., Sokolowska J., Šamaj F., Tomlain J., Volfová E., Wiszniewski W., Wit-Jozwikowa K., Zych S., Žák B., 1974. *Klíma Tatier*. Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava. 750s.
- Lapin M., Tomlain J., 2001: *Regionálna klimatológia*, Univerzita Komenského Bratislava, Bratislava, 2001, 210 s.
- Matyssek, R., Innes, J.L., 1999. Ozone – a risk factor for trees and forest in Europe? *Journal of Water, Air, Soil Pollution* 116, 196-226
- Matyssek, R., Wieser, G., Nunn, A. J., Kozovits, A. R., Reiter, I. M., Heerdt, C., Winkler, J. B., Baumgarten, M., Haberle, K. -H., Grams, T. E. E., Werner, H., Fabian, P., Havranek, W. M., 2004. Comparison between AOT40 and ozone uptake in forest trees of different species, age and site conditions, *Atmospheric Environment* 38: 2271-2281, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.078.

- Mansfield, T.A., Pearson, M., 1996. Disturbance in stomatal behavior in plants exposed to air pollution. In: Yunus, M., Iqbal, M. Plant Response to Air Pollution. John Wiley, NY, USA
- Mäkela A., Kolari P., Karimäki J., Nikinmaa E., Perämäki M., Hari P. 2006. Modelling five years of weather-driven variation of GPP in a boreal forest. *Agricultural Forest Meteorology*, 139. 382-398.
- McLaughlin, S.B., P.A. Layton, M.B. Adams, N.T. Edwards, P.J. Hanson, E.G.O'Neill, and W.K. Roy. 1994. Growth responses of 53 open-pollinated loblolly pine families to ozone and acid rain. *Journal of Environmental Quality* 23: 247-257.
- Mooney, H. A.; Winner, W. E. 1991. Partitioning response of plant stress. In: Mooney, H. A.; Winner, W. E.; Pell, E. J., eds. Response of plants to multiple stresses. New York City: Academic Press: 129-141.
- Nabel, 1999. Luftbelastung 1998. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Pell, E. J., N. Eckerdt, and A. J. Enyedi. 1992. Timing of ozone stress and resulting status of ribulose biphosphate carboxylase /oxygenase and associated net photosynthesis. *New Phytologist* 120: 397-405.
- Skärby, L., Wallin, G., Sellden, G., Karlsson, P.E., Ottosson, S., Sutinen, S. & Grennfelt, P. 1995. Tropospheric ozone - a stress factor for Norway spruce in Sweden. *Ecological Bull.* 44: 133-146.
- Taylor, G. E., Johnson D. W., and Andersen Ch. P., 1994. Air Pollution and Forest Ecosystems: A Regional to Global Perspective. *Ecological Applications*, 4, 662- 689
- Volin, J.C., Tjoelker, M.G., Oleksyn, J., Reich, P.B., 1993. Light environment alters response to ozone stress in seedlings of *Acer saccharum* Marsh. And hybrid *Populus L. II*. Diagnostic gas exchange and leaf chemistry. *New phytologist* 124, 637-646.
- Wieser, G., 1997. Ozone impact on photosynthetic capacity of mature and young Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.): external versus internal exposure. *Phyton* 37, pp. 279–302
- Wieser G., Hasler R., Gotz B., Koch W., Havranek W.M., 2000: Role of climate, crown position, tree age and altitude in calculated ozone flux into needles of *Picea abies* and *Pinus cembra*: A synthesis. *Environmental Pollution*, 109 (3), pp. 415-422.
- Yarnal, B., 1993. Synoptic Climatology in Environmental Analysis. Belhaven/CRC Press London.
- Závodský, D., Závodská, E. 1992: Kvalita ovzdušia a zmeny klímy. NKP ČSFR 7, Praha 1992, 4 – 50

5. PUBLIKOVANÉ PRÁCE UCHÁDZAČA

Karentované:

Župek, B., Minkkinen, K., Starr, M., Kolari, P., M., Chan, T., Vesala, T., Alm, J., Laine, J. and Nikinmaa, E. 2008. Forest floor versus ecosystem CO₂ exchange along boreal ecotone between upland forest and lowland mire. *Tellus B*, 60(2):153-166.doi:10.1111/j.1600-0889.2007.00328.x

Iné:

- Ľupek, B., 2002: Ozone tropospheric concentrations in the Biosphere Reservation Poľana in relation to the types of synoptic situations. V. konferencia mladých meteorológov a klimatológov - Zborník SHMÚ . SHMÚ, Bratislava, 2002.
- Alm, J., Ľupek, B., Lyytikäinen, V., Luotonen, H. & Saarnio, S. 2003. Emissions of CH₄ and N₂O from wetland buffer zones trapping nutrients released by forestry. In: Workshop The Carbon Balance of Aquatic and Terrestrial Ecosystems and their Interaction. Nordic Centre for Studies of Ecosystem Carbon Exchange and its Interactions with the Climate System, 27.-28.10.2003, Lammi Biological Station, University of Helsinki, Finland. Abstracts. 1 p.
- Alm, J., Ľupek, B., Saarnio S., Lyytikäinen V., Luotonen H. 2004: Changes in vegetation and release of CH₄ and N₂O from buffer wetlands receiving nutrients and solids from forest management in the catchment . In: Verhoeven, J.T.A., Dorland, E. & Coemans, M. (webmaster) (eds.). 7th INTECOL International Wetland Conference, Utrecht, The Netherlands, 25-30 July 2004. Book of Abstracts. Universiteit Utrecht, p. 11
- Alm, J., Pardell, E., Ľupek, B., Korhola, A., Turunen, J. & Tolonen, K. 2004. Spatial and temporal analysis of landscape paludification and its atmospheric interactions over the Holocene. In: Päivänen, J. (ed.). Wise Use of Peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress, Tampere, Finland, 6-11 June 2004. Vol.2. Poster presentations. International Peat Society, Saarijärvi. p. 961-967.
- Ľupek, B., Minkkinen K, Gazovic, M., Slizikova, M., Alm, J., Laine, J. 2006: Methane dynamics along hydrological gradient from upland forest to lowland mire. Poster, NECC workshop, 6-8.3.2006, Umea, Sweden. Available: <http://www.necc.nu/NECC/Workshop/Umea2006/Poster/05.pdf>
- Ľupek, B., Minkkinen K, Alm, J., Laine, J, Vesala T., Nikinmaa E. 2006: CO₂ dynamics along biogeochemical catena from upland forest to lowland mire.. Presentation, NECC workshop, 6-8.3.2006, Umea, Sweden. Available: <http://www.necc.nu/NECC/Workshop/Umea2006/>
- Ľupek, B., Minkkinen, K., Vesala, T., Alm, J., Laine, J. and Nikinmaa, E. 2006. Forest floor CO₂ dynamics along an upland forest-lowland mire catena. In: Kulmala, M., Lindroth, A. & Ruuskanen T.M. (eds.). Proceedings of BACCI, NECC and FCoE activities 2005. Report Series in Aerosol Science 81B:628-630 http://www.necc.nu/NECC/Inf/AbAR05/Pdf_files/30.pdf
- Ľupek, B., Minkkinen, K., Starr, M., Vesala, T., Alm, J., Laine, J. and Nikinmaa, E. 2008. Contribution of ground vegetation carbon fluxes into boreal forest and mire ecosystems carbon dynamics. In: Kulmala, M., Bäck, J. & Salonen, M. (eds.). Proceedings of the Finnish Center of Excellence "Research Unit of Physics, Chemistry and Biology of Atmospheric Composition and Climate Change" Activities in 2002-2007. Report Series in Aerosol Science 94: 155-159.
- Ľupek, B., Minkkinen, K., Vesala, T., Starr, M., Alm, J., Laine, J. and Nikinmaa, E. 2008. Environmental extremes and carbon dynamics across the boreal forest-mire ecotone. Poster, NECC workshop, 6-8.3.2008, Kuopio, Finland. Available: http://www.mm.helsinki.fi/mmeko/HENKILOKUNTA/tupek/POSTER_BTupek08_small.pdf